

# ENTP에 의한 고압 유도전동기의 진공차단기 스위칭서지 시뮬레이션

이은용, 김종겸\*, 김일중\*\*, 김택수 이성철\*\*\*  
 충남대, 주성전문대, 한전기술연구원

The Simulation of VCB Switching Surge in the High Voltage Induction motors by  
 ENTP

(LEE, Eun Woong, Kim, Jong Kyeom, Kim, IlJung, Kim, Taek-Soo, Lee, Sungchul)  
 (Chung-Nam National University, Ju-Seong Junior College, KEPCO Research Center )

## Abstract :

Steep-fronted surges associated with motor switching cause relatively large turn-to-turn winding stress. In order to calculate the surge level at the motor terminals, equivalent circuits consist of three parts with power sources, load cable and motor constants.

This paper presents switching surges phenomena occurred in a high voltage induction motor switching by ENTP

## 1. 서론

진공차단기(VCB)는 여러가지 우수한 특성을 가지고 있는 반면, 개폐시 발생하는 높은 서지전압과 다중재발화가 전동기의 절연파괴사고의 원인이 되고, 권선 절연의 열화를 촉진 시킨다. 그래서 VCB 제작회사 마다 서지 흡수장치(Surge Absorber)를 개발하여 설치하도록 하여 서지를 저감시키려 하고 있으나 그 해석이 미묘하고, 그 효과 또한 매우 불확실한 실정이다. 더욱이 전동기의 소형화, 저가격화를 위한 합리적인 설계를 위해서도 정확한 개폐서지의 해석이 요구된다. 그래서 본 연구는 유도전동기 부하 회로에서 발생하는 스위칭서지를 조사 정리하고, ENTP(Electric Magnetic Transient Program)을 사용하여 개폐시 발생하는 서지로부터 전동기를 보호하기 위한 절연내력과 보호장치의 설계시 필요로 하는 전기적현상을 알아내기 위한 것이다.

## 2. 스위칭서지의 종류

유도성 부하에 해당하는 유도전동기를 전원에서 그림 1 과 같이 진공차단기를 사용하여 개폐할 때는 전류제단, 다중재발호, 3상 동시차단, 투입서지등의 발생이 문제이고, 재점호는 발생하지 않으므로 문제가 되지 않는다.

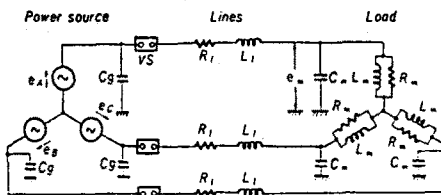


그림 1. 유도전동기 동가회로

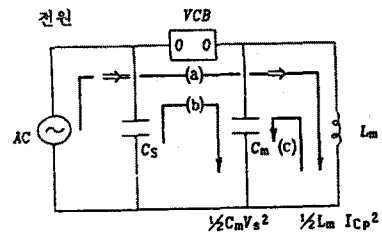
## 2.1 제단서지

전류를 차단할 때, 전류의 자연영점에 도달하기전에 강제적으로 차단해 버리는 제단현상이 발생하게 된다. 이때 제단전류와 회로의 서지 임피던스의 곱에 해당하는 서지전압이 발생하게 된다. 전류제단 현상은 전극을 구성하는 재료의 용융점, 증기압, 일함수, 이온화 에너지등의 많은 실제적인 요소들에 의해 좌우된다. 특히, 전류제단은 소용량 유도전동기의 지연전류의 차단시에 발생하기 쉬운 현상이다.

전류제단 현상은 음극점에서 부터 금속증기나 하전입자의 공급이 아크중에 진공으로 확산하는 하전입자나 금속증기를 따를수 없기 때문에 생기는 것으로 분석된다. 따라서 음극점에서 부터 금속증기의 공급능력을 적게하므로써 전류제단레벨을 감소시킬 수 있다.

## 2.2 재발호서지

진공차단기의 극이 충분히 열리지 않은 사이에 전류가 끊어지거나, 그후에 가해진 회복전압이 극간의 내전압을 상회하여 섬락하는 현상이 재발호이다. 섬락에 의한 고주파전류가 흐르지만 그 고주파전류가 차단되면 다시 극간에 회복전압이 가해진다. 이 회복전압이 극간의 내전압을 상회하면 다시 섬락하여 극간의 내전압이 회복전압을 상회하기 까지 이 현상이 반복되면서 전압이 상승한다. 이 현상을 다중재발호라 한다. 이 과전압은 그 준도가 극히 높아 전동기 권선에 침입하면, 극부적인 단위 상승을 일으켜 절연파괴나 절연열화를 이룰 수 가 있다. 이 재발호서지의 전압상승 메카니즘은 다음과 같다.



(a) 주루프 (b) 발호루프 (c) 제단루프

그림 2. 회로도

그림 2는 시스템회로를 나타낸 것이고, 그림 3은 진공차단기의 부하측 전압과 극간전류파형, 그리고 인덕턴스  $L_m$ 에 흐르는 전류를 나타내고 있다. 부하측의 과전압은, 그림 2의 부하측 캐패시턴스와 인덕턴스가 만드는 제단루프인  $L_m - C_m$ 의 루프에 있어서, 전류형으로서  $L_m$ 에 저장되어 있는 에너지가 캐패시턴스  $C_m$ 에 전압형으로서 방출되는 것에 의해 발생한다. 이와 같은 에너지의 변동은 제단서지의 발생 메카니즘과 같은 것으로서, 여기서는 편의상 이 루프를 제단루프라 부른다.

그림 3의 a 점에서 발호가 발생하면, 발호루프인  $C_s - VCB - C_m$ 의 루프에 발호전류가 흐른다. 이 발호전류는 수 사이클 후러 차단되는 경우가 많고, 발호전류가 흐르고 있는 동안 전극間이 아-크로 연결되어 있는 것으로서, 발호루프만이 아니고, 주 루프 전원- $VCB-L_m$ 의 루프에도 전류가 흐른다. 이 주 루프를 통해서 전원에서  $L_m$ 에 에너지가 주입되고,  $L_m$ 에 흐르는 전류가 증가한다.

발호전류가 차단되면, 다시 제단루프에서의 진동이 시작된다. 이 현상은  $L_m$ 에 흐르고 있던 전류를 제단하는 것과 같은 결과를 초래하고, 부하측에 서지전압이 발생한다.

여기서 문제가 되는 것은, 발호전류에 의해서 전류 제로점이 강제적으로 만들어지는 것으로서, 진공차단기 본래의 전류 제단 값보다 큰 전류에서도 외관상 제단하는 것이 가능하다고 하는 것이다. 따라서  $L_m$ 에 흐르고 있는 전류가 크게 될 수록 발생하는 과전압도 크게 되어진다.

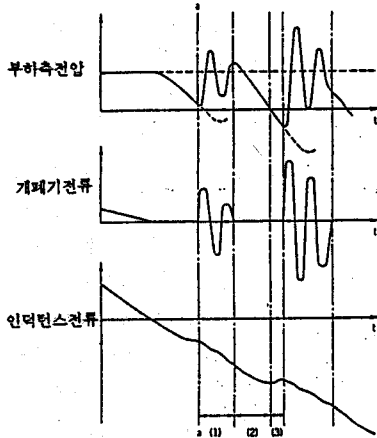


그림 3. 전압상승 메카니즘

- (1) 발호해서 극간이 아-크로서 연결되어 있는 기간. 이 사이는 메인 루프를 통해서  $L$ 에 에너지가 주입되고 있다.
- (2) 발호전류가 차단되기 때문에,  $L$ 을 흐르는 전류가 피-크를 맞이하기 까지의 기간. 이 사이는 제단루-프로서  $C$ 에서  $L$ 로 에너지가 이동한다.
- (3)  $L$ 을 흐르고 있는 전류가 피-크를 맞고 나서, 다음의 발호가 일어나기 까지의 기간. 이 사이는 제단루-프로서  $L$ 에서  $C$ 로 에너지가 이동한다.

다중 재발호서-지에서 발생전압이 상승해 가는 것은, 이 (1)에서 (3)의 과정이 반복되고,  $L$ 의 에너지가 증가해서 발생하여

얻는 전압이 상승해 가기 때문이다. 이것과 캐패시턴스 길이의 증가에 의한 극간의 내압상승과 서로 얽혀서, 발생전압의 상승을 생겨나게 한다.

이상과 같이 발호서-지는 진극간의 섬락과 고주파전류의 차단을 반복해 나가면서 발생전압이 상승해 가는 현상이다.

### 2.3 3상 동시차단

3 상중의 한상인 a 상에 재발호가 일어날 때, 고주파전류가 흐른다. 이 고주파전류는 상간 결합에 의해 다른 2 상 b, c 에 고주파전류를 유도한다. 전동기의 경우에 b, c 상의 부하전류보다 유도된 고주파전류가 더 높기 때문에, 진공차단기를 통하는 전류는 전류영점을 취하게 된다. 이는 第 2,3 篇에 부하전류의 차단을 이끈다. b, c 상에 고주파 전류차단은 진공차단기의 통계적 특성에 따른다. 만일 차단이 2,3 篇에서 일어나면, 3 상 모두가 동시에 차단되게 된다.

재발호에 의한 고주파전류는 회로의 표유캐패시턴스를 개재시켜 다른 상에도 흘러

상용주파의 電源電流에 중첩하여 강제적으로 전류영점이 형성되게 하며 그 전류 영점에서 진공차단기가 고주파소호능력을 갖는 것처럼 전류가 차단된다. 이 때 재발호한 상과 다른 2 상이 동시에 차단되는 것처럼 관측되기 때문에 이를 3 상 동시차단이라고 부른다.

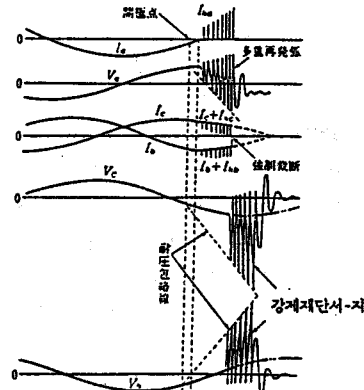


그림 5. 삼상 동시차단현상

### 2.4 투입서지

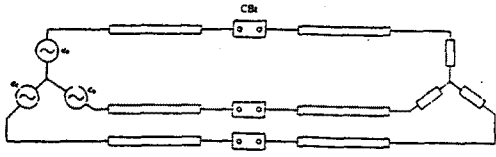
진공차단기를 투입할 때에는 접점이 접촉하기 직전에 짧은 접점간극이 섬락하는 선행방전(Prestriking)이 발생할 수 있다. 또 접점이 접촉할 때의 반동으로 짧은 시간이지만, 접점이 개리하는 Chattering 현상을 이트키는 수가 있다 이 때 조건에 따라서는 한번 전류가 차단될 수가 있다. 이 현상을 차단시의 재발호효과 유사한 현상이지만, 빠른 속도로 접점이 작용하고 접점간극이 짧은 상태에서는 접점간의 내전압도 낮기 때문에 꽤 높은 서-지 전압은 발생치 않는것이 보통이다.

### 2.5 재점호서지

전류차단후 1/4 cycle 以後에 극간이 섬락하는 현상을 재점호라 하며, 재점호에 의한 서지가 문제로 되는 것은 전류차단후에 높은 전압이 가해져서 콘덴서 뱅크나 케이블의 충전전류를 차단하는 경우이다. 따라서 유도전동기 경우와는 별개의 문제이다.

3. 모의 구성회로

그림 6 에 적용 전동기의 서지해석을 위한 ENTP 시뮬레이션의 모델회로를 나타낸다. 이 모델을 이용하여 본 연구에 ENTP 기법을 적용하는 시도를 하고자 한다.



전원 전원측 케이블 차단기 부하측 케이블 유도전동기  
그림 6. 유도전동기의 서지계산 회로도

표 1 은 그림 6 에 대한 해석 대상의 각 파라미터를 요약한 것이다.

표 1. 해석 모델의 Parameters

구분	저항	리액턴스	캐패시턴스
전동기	52,231 [Ω]	23.91[mH]	0.00885[μF]
6.6KV 260KW			
케이블, 219H 150SQ, 219H	0.04[Ω]	0.072[mH]	0.10[μF]
C-R Suppressor	0[Ω] 100[Ω]	-	0.1~0.3[μF]

4. 해석

회로현상의 범용과도 해석 프로그램으로 해서 널리 쓰이고 있는 ENTP를 사용하여 제단 및 발호서지를 모의한다. 회로의 모델화에 대하여서는 모두 집중정수화해서 취급하고, 케이블은 T 형 회로로 나타냈다. 그림 7 은 제단서지에 대한 서지전압의 계산파형의 예를 나타낸 그림이다. 발호서지의 모의에는 진공차단기의 내압특성과 고주파전류차단특성, 그리고 회로의 모델화가 필요하다.

발호서지의 모의는 진공차단기의 동작을 발호한 상태를 스위치의 閉, 차단한 상태를 스위치의 開에 대응한다. 이를 위해 ENTP의 TACS(Transient Analysis of Control System)기능을 써서 스위칭을 모의한다.

그림 8 에 TACS 에 의한 스위치 제어신호의 발생을 나타낸다. 스위치가 열려있는 상태에서는 각 계산 step 마다 step 당당의 전압으로 부터 전극간의 전계강도를 구하여 이것이 섬락레벨을 넘을 때에 스위치를 연다.

고주파전류는 영점이 아니면 차단되지 않기 스위치를 흐르는 전류를 감시해서 그것이 영점을 통과하는가 어떤가를 판정해서 다음에 소정의 차단레벨을 만족하는 경우에 스위치를 연다.

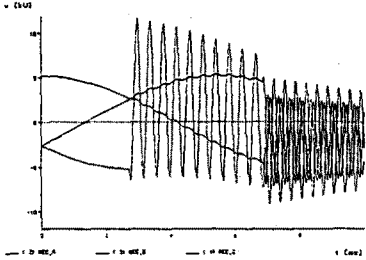


그림 7. 제단서지 계산파형에

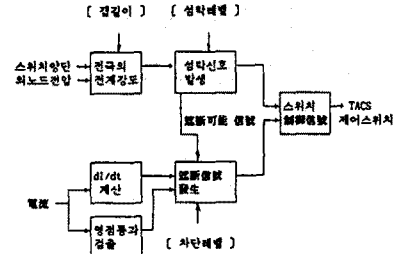


그림 8. TACS에 의한 SWITCH 제어신호의 발생

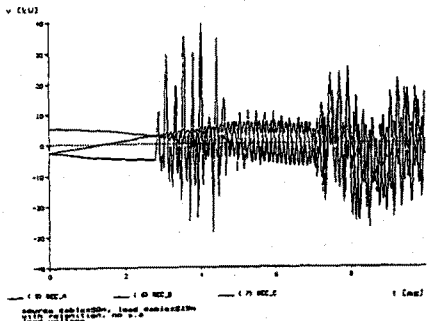


그림 9. 재발호서지의 계산파형에

이상의 과정을 반복한 계산을 한것이 그림 9 에 나타낸 파형이다.

ENTP 에 의한 시뮬레이션에서는 회로를 자유로이 구성하거나 변경할 수 있는 것이 용이한 이점을 지니고 있다.

또한 그 범용성이 넓다. 예를들면 Surge absorber 유무 계산을 하여 그 효과를 사전에 검토하는 등 실제의 응용에서는 앞으로 중요하게 될 것이라고 생각한다.

5. 결론

제단서지 및 발호서지에 관해서 지금까지의 연구의 흐름은 발생 및 전압상승의 메카니즘, 시뮬레이션등의 화제를 소개 했다. 시뮬레이션 방법은 파라미터를 자유롭게 설정할 수 있는 잇점을 살려 회로조건이나 서지 보호방법의 차이가 발생하는 발생하는 서지전압에 주는 영향등의 검토에 사용하였다. 앞으로는 본 내용을 기초로하여 서지 저감을 위한 대책의 마련에 본 내용을 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

6. 참고문헌

- (1) 이 은 응의 2 인 "고압전동기의 스위칭서지저감방안" 전기학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 86-89, 1991
- (2) 조병욱, 김봉희, " TACS를 이용한 제어계 해석 " 대한전기학회 학술지 ENTP 특집 Vol, 40, No, 10, pp. 30-35, 1991
- (3) BPA, "Electric-Magnetic Transients Program Rule Book" 1985.
- (4) K.Yokokura et al., " Multiple Restriking Voltage in a Vacuum Circuit Breaker on Motor Insulation " IEEE Trans of Pover Apparatus System Vol, PAS-100, No.4, pp. 1940-1946. 1981

본 연구는 한전기술연구원의 지원으로 연구 되었습.